

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-369-17>

УДК 624.07:623.454.2

БІСІК СЕРГІЙ

Національний університет оборони України

<https://orcid.org/0000-0002-5009-2113>e-mail: sergey-new@ukr.net**ОРЛЕНКО МИХАЙЛО**

Київський національний університет будівництва і архітектури

<https://orcid.org/0009-0001-9890-4520>e-mail: orlenko_mo-2022@knuba.edu.ua

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ПАРАМЕТРІВ ПОВІТРЯНОЇ УДАРНОЇ ХВИЛІ ТА ЗБІЖНІСТЬ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРИ ОЦІНЦІ ВИБУХОСТІЙКОСТІ СВІТЛОПРОЗОРИХ ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ

У статті зіставлено п'ять аналітичних моделей визначення тиску повітряної ударної хвилі (Садівського, Kingery–Bulmash, Kinney–Graham, Newmark–Hansen, Henrych) на робочих відстанях полігонних випробувань та оцінено збіжність чисельного розв'язку в ANSYS LS-DYNA за послідовного згущення сітки від 50 до 2 мм. Рациональним визначено розмір скінченного елемента 5 мм, за якого відносна похибка за тиском відбитої хвилі становить 4,9 %. Показано, що на відстанях понад 1,5–2 м форма заряду практично не впливає на тиск, що діє на конструкцію, і це дозволяє застосовувати у випробуваннях технологічно простіші циліндричні заряди.

Ключові слова: світлопрозорі огороджувальні конструкції; повітряна ударна хвиля; вибухові навантаження; вибухостійкість; метод скінченних елементів; чисельне моделювання.

BISYK SERHII, ORLENKO MYKHAILO

National University of Defense of Ukraine; Kyiv National University of Construction and Architecture

COMPARATIVE ANALYSIS OF MATHEMATICAL MODELS OF AIR BLAST WAVE PARAMETERS AND CONVERGENCE OF NUMERICAL SIMULATION IN ASSESSING THE BLAST RESISTANCE OF GLAZED BUILDING ENVELOPE STRUCTURES

This article presents a systematic comparative analysis of five analytical models for determining the overpressure of an air blast wave — specifically, the models of Sadovsky, Kingery–Bulmash, Kinney–Graham, Newmark–Hansen, and Henrych — at the operational distances relevant to field testing of glazed building envelope structures (translucent enclosing structures). The analysis focuses on the near-field zone (0.5–3.0 m from the charge centre), which is the critical range for blast resistance testing of windows, curtain walls, and glass partitions in accordance with DSTU EN 13124-2. The key blast wave parameters considered include peak incident overpressure, reflected pressure, positive phase duration, and impulse. The study reveals significant discrepancies among the analytical models in the near-field zone: at a stand-off distance of 0.5 m, the predicted overpressure values range from 6,633 kPa (Henrych) to 19,290 kPa (Sadovsky), representing a threefold difference. As the distance increases to 3.0 m, the spread narrows considerably to 161–254 kPa, demonstrating that model selection becomes less critical at greater stand-off distances. A detailed finite element analysis was performed using ANSYS LS-DYNA with a two-dimensional Arbitrary Lagrangian–Eulerian (2D ALE) formulation. The detonation products were modelled using the Jones–Wilkins–Lee (JWL) equation of state coupled with the *MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN material model; air was treated as an ideal gas with an adiabatic index of 1.4; and the steel wall and soil were described by the Johnson–Cook plasticity model with the Mie–Grüneisen equation of state. Mesh convergence was evaluated by progressively refining the element size from 50 mm down to 2 mm. The results show that a 5 mm element size provides a relative error of 4.9% for reflected wave pressure on a vertical rigid wall compared with the Kingery–Bulmash reference, while further refinement to 2 mm reduces the error to approximately 2% but increases the computational data volume to 300 GB per single run, making it impractical for routine engineering calculations. Additionally, the influence of the charge geometry (spherical versus cylindrical) was investigated. The comparison demonstrates that charge shape affects the blast pressure only within 1.5–2.0 m from the detonation centre; at the standard test distances specified by DSTU EN 13124-2, the difference in reflected pressure between spherical and cylindrical charges does not exceed 3%. This finding justifies the use of cylindrical charges assembled from standard TNT blocks as a technologically simpler alternative to spherical charges in field blast testing of translucent enclosing structures. The verified numerical model established in this work provides a validated computational framework for subsequent analyses of the stress–strain state and elasto-plastic deformation of glazed envelope components — including glass panes, aluminium framing profiles, and fastening assemblies — under blast loading.

Keywords: glazed building envelope structures; air blast wave; explosive loads; blast resistance; finite element method; numerical simulation.

Стаття надійшла до редакції / Received 11.08.2026

Прийнята до друку / Accepted 24.09.2026

Опубліковано / Published 15.10.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Бісик Сергій, Орленко Михайло

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Події останніх років кардинально змінили ситуацію в Україні: вибухові впливи техногенного та воєнного походження перетворилися з гіпотетичної загрози на постійний чинник, і першими на них реагують саме світлопрозорі огороджувальні конструкції (СОК) — вікна, фасадне скління, скляні перегородки. Пошкодження цих елементів призводить не лише до фізичних руйнувань, а й до утворення небезпечних вторинних уламків, які загрожують життю та здоров'ю людей у приміщеннях. Тому перед тим як переходити до проектування та випробувань вибухостійких конструкцій, необхідно визначитися з ключовим питанням — які параметри повітряної ударної хвилі закладати в розрахунок.

Основними параметрами тут є максимальний надлишковий тиск на фронті хвилі, тривалість позитивної фази та імпульс — саме вони визначають характер навантаження на конструкцію. Для їх оцінки запропоновано значну кількість аналітичних та емпіричних моделей, побудованих на узагальненні експериментальних даних. На малих відстанях від центру вибуху різні залежності дають розбіжність у рази — і однозначної відповіді, які значення закладати в розрахунок, у літературі немає. Точність чисельного моделювання методом скінченних елементів, у свою чергу, визначається кроком дискретизації розрахункової області: надмірне подрібнення сітки призводить до різкого зростання часу обчислення та обсягу розрахункових даних. Саме тому в цій статті зупинимось на системному зіставленні аналітичних моделей між собою та з чисельним розв'язком і визначимо, за якого розміру скінченного елемента похибка стає прийнятною.

Аналіз досліджень та публікацій

Порівняльний огляд математичних моделей оцінки параметрів ударної хвилі вибуху зарядів вибухової речовини виконано у [1], де за результатами зіставлення розрахунків з експериментальними даними виокремлено моделі, що забезпечують найкращу відповідність вимірюванням. Огляд математичних моделей та методів дослідження поширення вибухових навантажень у суцільних середовищах, включно з аналізом напружено-деформованого стану та пластичних деформацій конструкцій за високошвидкісного навантаження, наведено у [2]. Питання нелінійного деформування елементів конструкцій у пружно-пластичній постановці методом скінченних елементів, зокрема дослідження напружено-деформованого стану у процесах формозмінення, розглянуто у [3]. Застосування методу скінченних елементів до аналізу впливу ударної хвилі на втрату стійкості тонкостінних конструкцій висвітлено у [4]. Фактори, які визначають безпеку вікон за дії вибухової хвилі, ідентифіковано у [5].

Аналіз міжнародних стандартів випробувань СОК на стійкість до ударних хвиль та досвід натурних полігонних випробувань віконних блоків різного конструктивного складу викладено у працях автора [6; 7]. Класичні залежності для параметрів вибухових ударних хвиль наведено у монографіях [8–10] та узагальнені в емпіричній моделі Kingery–Bulmash [11]. Методи моделювання дії повітряного вибуху на конструкції у програмному комплексі LS-DYNA порівняно у праці [12]; теоретичні основи відповідних чисельних методів викладено у [13].

Водночас у наведених працях порівняння аналітичних моделей і чисельного розв'язку виконувалося переважно для задач захисту військової техніки або масивних будівельних конструкцій. Для СОК подібне зіставлення досі не проводилось. А специфіка тут суттєва: конструкція легка, багаточарова, працює на короткий імпульс — і робочі відстані полігонних випробувань (0,5–3,0 м) припадають саме на ту зону, де аналітичні моделі розходяться найбільше.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є обґрунтування параметрів математичного та чисельного моделювання повітряної ударної хвилі для задач оцінки вибухостійкості світлопрозорих огорожувальних конструкцій. Завдання дослідження: виконати порівняльний аналіз аналітичних моделей визначення тиску ударної хвилі на робочих відстанях випробувань; оцінити збіжність чисельного розв'язку за розміром скінченного елемента; зіставити результати чисельного моделювання з аналітичними розрахунками; оцінити вплив форми заряду на параметри ударної хвилі.

Виклад основного матеріалу

Математичні моделі параметрів повітряної ударної хвилі

Основними параметрами повітряної ударної хвилі є швидкість фронту, час прибуття до об'єкта, максимальний надлишковий тиск на фронті, тиск негативної фази, тривалості позитивної та негативної фаз і відповідні імпульси. Ці параметри залежать від маси заряду вибухової речовини, відстані до об'єкта, швидкості звуку в повітрі та атмосферного тиску. Спільною для розглянутих моделей є масштабована відстань, яку визначають за формулою (1):

$$Z = \frac{R}{\sqrt[3]{W}} \quad (1)$$

де R — відстань від центру заряду, м; W — маса заряду в тротиловому еквіваленті, кг.

За результатами порівняльного аналізу [1] для подальшого дослідження обрано п'ять моделей, які забезпечують найкращу відповідність експериментальним даним. Модель М. О. Садовського, наведену в огляді [1], для повітряного вибуху записують у вигляді (2), МПа:

$$P_{SO} = \frac{0,084}{Z} + \frac{0,27}{Z^2} + \frac{0,7}{Z^3} \quad (2)$$

Емпірична модель Ч. Кінгері та Дж. Балмеша (Kingery–Bulmash) [11] ґрунтується на найповнішій базі експериментальних даних і має вигляд полінома (3) з табличними коефіцієнтами $A_1 \dots G_1$ для трьох діапазонів масштабованої відстані, кПа:

$$P_{SO} = \exp(A_1 + B_1 \ln Z + C_1 \ln Z^2 + D_1 \ln Z^3 + E_1 \ln Z^4 + F_1 \ln Z^5 + G_1 \ln Z^6) \quad (3)$$

Модель Дж. Кінні та К. Грема (Kinney–Graham) [8] подають у формі відношення надлишкового тиску до атмосферного тиску P_0 (4):

$$\frac{P_{SO}}{P_0} = \frac{808[1 + (\frac{Z}{4,5})^2]}{\sqrt{1 + (\frac{Z}{0,048})^2} \sqrt{1 + (\frac{Z}{0,32})^2} \sqrt{1 + (\frac{Z}{1,35})^2}} \quad (4)$$

Модель Н. Ньюмарка та Р. Гансена (Newmark–Hansen) [9] має вигляд залежності (5), бар, у якій масу заряду W підставляють у тоннах:

$$P_{SO} = 6784 \frac{W}{R^3} + 93 \sqrt{\frac{W}{R^3}}. \quad (5)$$

Модель Й. Генріха (Henrych) [10] задається окремими виразами для трьох діапазонів масштабованої відстані; для діапазону $0,3 < Z \leq 1$, що охоплює ближню зону цього дослідження, використовують формулу (6), бар:

$$P_{SO} = \frac{6,194}{Z} - \frac{0,326}{Z^2} + \frac{2,132}{Z^3}. \quad (6)$$

Аналітичні вирази (2)–(6) мають різну структуру — від степеневих поліномів за оберненою масштабованою відстанню до раціональних функцій, — що й зумовлює розбіжність результатів у ближній зоні вибуху.

Чисельна модель та інструментарій моделювання

Чисельне моделювання виконано методом скінченних елементів у ліцензійному програмному комплексі ANSYS LS-DYNA із застосуванням двовимірної лагранжево-ейлерової зв'язування (2D ALE). Скінченно-елементна модель утворена повноінтегрованими двовимірними S/R елементами з вибіркоким пониженням порядку інтегрування. Розміри розрахункової області становлять 2620×3250 мм; заряд тротилу масою 3 кг (у тротилітовому еквіваленті) розташовано на висоті 0,5 м над відбивною поверхнею на відстані 3,0 м від вертикальної сталеві стінки, яка є об'єктом навантаження. Контрольні точки T1–T6 розміщено з кроком 0,5 м уздовж траси поширення хвилі (рис. 1). Розглянуто дві форми заряду однакової маси: сферичну (діаметр 154,0 мм) та циліндричну (висота і діаметр основи 134,5 мм).

Продукти детонації описано рівнянням стану Джонса–Уілкінса–Лі (JWL) разом із моделлю детонації *MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN; повітря — лінійним поліноміальним рівнянням стану, що для показника адіабати 1,4 відповідає моделі ідеального газу; поведінку матеріалу сталеві стінки та ґрунту — моделлю пластичності Джонсона–Кука з рівнянням стану Мі–Грюнайзена [13]. Модель Джонсона–Кука враховує залежність напруження пластичної течії від ефективної пластичної деформації, швидкості деформації та гомологічної температури, що є визначальним для адекватного відтворення пружно-пластичного деформування конструкційних матеріалів за високошвидкісного вибухового навантаження. Параметри моделей матеріалів прийнято за [12; 13].

Оцінку збіжності чисельного розв'язку виконано послідовним згущенням скінченно-елементної сітки: розглянуто розміри елемента 50, 40, 30, 20, 10, 5 та 2 мм. Критерієм оцінки слугували значення максимального надлишкового тиску повітряної ударної хвилі в контрольних точках та тиску відбитої хвилі на вертикальній стінці.

Результати досліджень та їх аналіз

Розраховані за п'ятьма аналітичними моделями значення тиску падаючої ударної хвилі у контрольних точках, а також тиску відбитої хвилі за моделлю Kingery–Bulmash наведено в табл. 1 та на рис. 2.

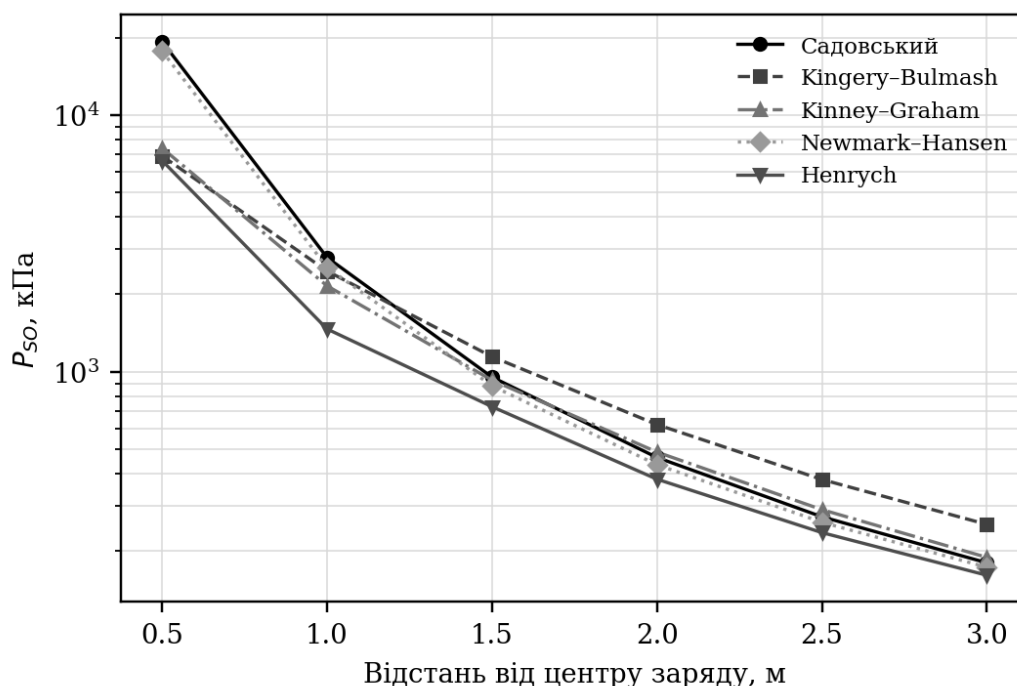


Рис. 2. Тиск повітряної ударної хвилі залежно від відстані за різними аналітичними моделями (сферичний заряд 3 кг ТНТ)

Таблиця 1

Аналітичні значення тиску повітряної ударної хвилі (сферичний заряд 3 кг ТНТ), кПа

Відстань, м	Садовський	Kingery–Bulmash	Kinney–Graham	Newmark–Hansen	Henrych	Відбита (К–В)
0,5	19290	6917	7420	17720	6633	76594
1,0	2783	2464	2157	2545	1465	20326
1,5	952	1143	926	880	730	7409
2,0	463	622	486	434	381	3244
2,5	272	380	290	259	236	1652
3,0	180	254	189	173	161	951

Як можна побачити з рис. 2, характер кривих у всіх моделей однаковий — тиск падає з відстанню. Розбіжність у цифрах натомість велика. При 0,5 м модель Садовського дає 19290 кПа, Kingery–Bulmash — 6917 кПа, Henrych — 6633 кПа, тобто у ближній зоні різниця сягає трьох разів. До відстані 3,0 м вилка звужується до 161–254 кПа. Причина такого розкиду — різна експериментальна база, на якій свого часу калібрували кожну із залежностей, і різна структура самих апроксимаційних формул. Тобто якщо розглянути всі контрольні точки, можна побачити чітку залежність: зі зменшенням відстані до заряду невизначеність аналітичної оцінки зростає, що унеможливує використання одиничної моделі без додаткової верифікації.

Результати чисельного моделювання тиску повітряної ударної хвилі в контрольних точках для сферичного та циліндричного зарядів за різних розмірів скінченного елемента наведено у табл. 2 і 3 та на рис. 3.

Таблиця 2

Тиск ударної хвилі при чисельному моделюванні підризу 3 кг сферичного заряду, кПа

Відстань, м	50 мм	40 мм	30 мм	20 мм	10 мм	5 мм
0,5	1700	1870	2260	4150	4630	5630
1,0	595	652	919	1110	1610	1860
1,5	511	578	621	701	716	760
2,0	254	261	341	383	469	534
2,5	122	135	176	199	240	265
3,0*	259	307	396	560	718	998

* у точці Т6 на вертикальній стінці фіксується тиск відбитої хвилі

Таблиця 3

Тиск ударної хвилі при чисельному моделюванні підризу 3 кг циліндричного заряду, кПа

Відстань, м	50 мм	40 мм	30 мм	20 мм	10 мм	5 мм
0,5	1540	1740	2760	3910	6990	7860
1,0	519	657	1130	1440	2600	2880
1,5	452	601	499	500	930	986
2,0	221	309	395	398	476	515
2,5	106	150	194	194	265	336
3,0*	221	325	437	523	710	971

* у точці Т6 на вертикальній стінці фіксується тиск відбитої хвилі

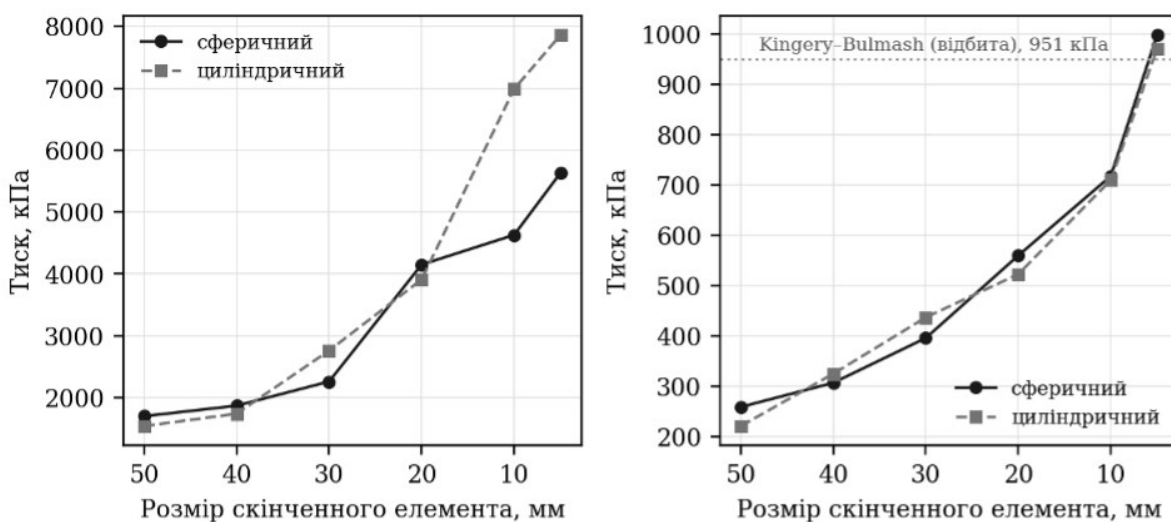


Рис. 3. Збіжність чисельного розв'язку за тиском ударної хвилі залежно від розміру скінченного елемента: а) відстань 0,5 м; б) відстань 3,0 м (вертикальна стінка)

Зі зменшенням розміру скінченного елемента розраховані значення тиску монотонно зростають і наближаються до аналітичних: у точці на відстані 0,5 м тиск для сферичного заряду збільшується з 1700 кПа

(елемент 50 мм) до 5630 кПа (5 мм), для циліндричного — з 1540 до 7860 кПа. Пояснюється це точнішим відтворенням фронту ударної хвилі та зменшенням чисельної дисперсії за дрібнішої дискретизації. На вертикальній стінці (відстань 3,0 м) чисельне значення тиску відбитої хвилі за сітки 5 мм становить 998 кПа для сферичного заряду проти аналітичного значення 951 кПа за Kingery–Bulmash; відносна похибка — 4,9 %.

Якщо підвести проміжний підсумок за табл. 4: перехід від сітки 5 мм до 2 мм зменшує похибку відносно Kingery–Bulmash та Henrych до 2,0–2,2 % (відстань 0,5 м). Ціна такого уточнення непропорційна — одна задача генерує до 300 Гбайт розрахункових даних, а рахується в рази довше. Тому, на нашу думку, для практичних розрахунків такого класу задач достатнім є розмір елемента 5 мм.

Окремо слід зазначити вплив форми заряду. Порівняння результатів для сферичного та циліндричного зарядів показує, що він відчутний лише на відстанях до 1,5–2 м: у ближній зоні тиск для циліндричного заряду перевищує тиск сферичного (7860 проти 5630 кПа при 0,5 м, сітка 5 мм), що зумовлено спрямованістю розльоту продуктів детонації. Зі збільшенням відстані формування хвилі Маха нівелює вплив форми заряду, і на вертикальній стінці значення тиску практично збігаються (998 та 971 кПа). Отже, на робочих відстанях полігонних випробувань СОК за ДСТУ EN 13124-2 [14] заміна нормативного сферичного заряду циліндричним є допустимою; при цьому формування циліндричного заряду зі стандартних тротильових шашок є технологічно значно простішим.

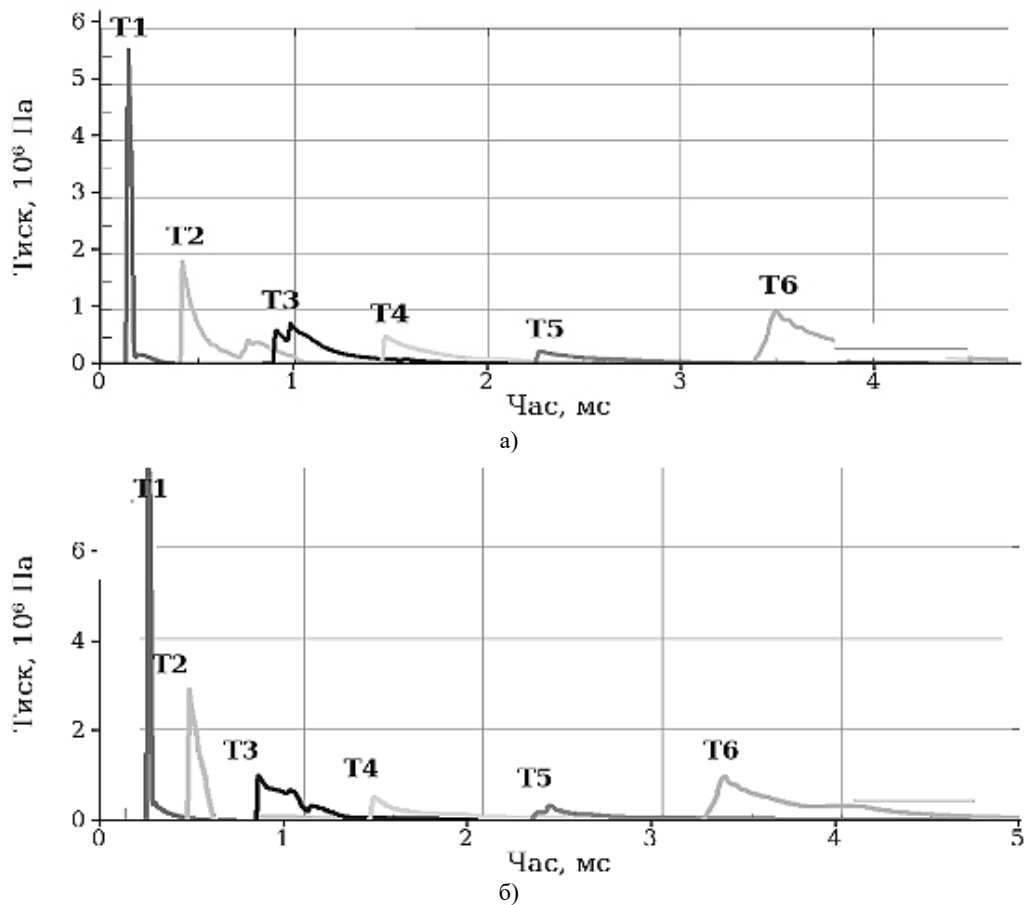


Рис. 4. Залежності тиску повітряної ударної хвилі від часу в контрольних точках T1–T6 при підриві 3 кг сферичного (а) та циліндричного (б) зарядів ВР (розмір скінченного елемента 5 мм)

Таблиця 4

Відносна похибка визначення тиску між аналітичним рішенням та чисельним моделюванням (сферичний заряд), %

Відстань, м	Садівський	Kingery–Bulmash	Kinney–Graham	Newmark–Hansen	Henrych
Дискретизація скінченно-елементної моделі 5 мм					
0,5	70,8	18,6	24,1	68,2	15,1
1,0	33,2	24,5	13,8	26,9	27,0
1,5	20,2	33,5	17,9	13,6	4,1
Дискретизація скінченно-елементної моделі 2 мм					
0,5	64,9	2,0	8,6	61,7	2,2
1,0	34,6	26,1	15,6	28,5	24,2
1,5	22,9	35,8	20,7	16,6	0,5

Отримані результати формують верифіковану розрахункову основу для подальшого моделювання напружено-деформованого стану елементів СОК — скління, профільних систем та вузлів кріплення — за дії вибухових навантажень. Водночас отриманий результат має межу застосовності. Розміру елемента 5 мм достатньо, поки йдеться про поширення ударної хвилі в повітряному середовищі. Для тонкостінних елементів профільних систем цього вже замало — їхнє деформування відбувається у пружно-пластичній стадії, тому сітку в таких зонах доведеться подрібнювати локально.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

1. У ближній зоні розрахункові значення тиску за п'ятьма аналітичними моделями розходяться у 2–3 рази: при 0,5 м — від 6633 до 19290 кПа. На відстані 3,0 м вилка звужується до 161–254 кПа. Жодну з моделей не можна брати за основу окремо — потрібна верифікація чисельним розрахунком або експериментом.
2. Чисельний розв'язок методом скінченних елементів збігається монотонно при згущенні сітки від 50 до 2 мм. За елемента 5 мм похибка за тиском відбитої хвилі на вертикальній стінці становить 4,9 % відносно моделі Kingery–Bulmash. Сітка 2 мм зменшує похибку приблизно до 2 %, але одна задача розростається до 300 Гбайт розрахункових даних — тому раціональним визнано розмір 5 мм.
3. Форма заряду важить лише до 1,5–2 м від центру вибуху. На робочій відстані полігонних випробувань тиск на вертикальній стінці для сфери й циліндра розходиться менш ніж на 3 %, тож циліндричний заряд, який значно простіше зібрати зі стандартних тротильових шашок, у випробуваннях світлопрозорих огорожувальних конструкцій цілком заміняє нормативний сферичний.
4. Верифікована чисельна модель слугує основою для розрахунків напружено-деформованого стану та пружно-пластичного деформування елементів світлопрозорих огорожувальних конструкцій за дії вибухових навантажень. Наступний етап — локальне подрібнення сітки відображення особливостей поведінки профільних систем і вузлів кріплення під дією ударної хвилі та зіставлення розрахунків із даними натурних випробувань.

Література

1. Огляд математичних моделей оцінки параметрів ударної хвилі вибуху зарядів вибухової речовини / С. П. Бісик, Л. С. Давидовський, М. В. Телепа, О. Г. Нагорський, С. В. Бісик, А. А. Новосад. Озброєння та військова техніка. 2021. № 1. С. 77–84.
2. Огляд математичних моделей та методів дослідження поширення вибухових навантажень в суцільних середовищах / І. І. Солодей, Г. А. Затилюк, Е. Ю. Петренко, В. В. Шовківська. Опір матеріалів і теорія споруд. 2025. № 114. С. 76–82. DOI: 10.32347/2410-2547.2025.114.76-82.
3. Дослідження напружено-деформованого стану металевої смуги у процесі протяжки / Ю. В. Максим'юк, М. П. Кузьмінець, І. Ю. Мартинюк, О. В. Максим'юк. Опір матеріалів і теорія споруд. 2022. № 109. С. 229–238. DOI: 10.32347/2410-2547.2022.109.229-238.
4. Вплив ударної хвилі на втрату стійкості бронекорпусів легкоброньованих машин / М. А. Ткачук, А. Ю. Васильєв, А. В. Грабовський та ін. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Машинознавство та САПР. 2025. № 1. С. 73–91. DOI: 10.20998/2079-0775.2025.1.08.
5. Ратушняк Г. С., Панкевич В. В. Ідентифікація факторів, які визначають безпеку вікон при дії вибухової хвилі. Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. 2023. № 2(42). С. 42–48.
6. Орленко М. О. Випробування світлопрозорих конструкцій на стійкість до ударних хвиль: аналіз міжнародних стандартів та перспективи їх застосування в Україні. Сучасні проблеми архітектури та містобудування. 2025. Вип. 71. С. 658–669. DOI: 10.32347/2077-3455.2025.71.658-669.
7. Орленко М. О., Буравченко В. С., Бісик С. П. Досвід натурних випробувань віконних блоків різного конструктивного складу на ударно-хвильову стійкість. Опір матеріалів і теорія споруд. 2025. № 115. С. 383–395. DOI: 10.32347/2410-2547.2025.115.383-395.
8. Kinney G. F., Graham K. J. Explosive shocks in air. 2nd ed. Berlin ; New York : Springer-Verlag, 1985. 269 p.
9. Newmark N. M., Hansen R. J. Design of blast resistant structures. Shock and Vibration Handbook / eds. C. M. Harris, C. E. Crede. New York : McGraw-Hill, 1961. Vol. 3.
10. Henrych J. The dynamics of explosion and its use. Amsterdam : Elsevier, 1979. 558 p.
11. Swisdak M. M. Simplified Kingery airblast calculations. Minutes of the 26th DoD Explosives Safety Seminar. Maryland, 1994. 17 p.
12. Methods for modelling air blast on structures in LS-DYNA. Comparison and analysis / S. P. Bisyk, I. B. Chepkov, M. I. Vaskivskyu et al. Weapons and Military Equipment. 2019. № 1(21). P. 22–31. DOI: 10.34169/2414-0651.2019.1(21).22-31.
13. Hallquist J. O. LS-DYNA Theory Manual. Livermore : Livermore Software Technology Corporation, 2006. 680 p.
14. ДСТУ EN 13124-2:2006 (EN 13124-2:2004, IDT). Вікна, двері та жалюзі. Стійкість до вибуху. Метод випробування. Частина 2: Полігонне випробування. Київ : Держспоживстандарт України, 2008. 11 с.

References

1. Bisyk S. P., Davydovskiy L. S., Telepa M. V., Nahorskyi O. H., Bisyk S. V., Novosad A. A. Ohliad matematychnykh modelei otsinky parametriv udarnoi khvyli vybukhu zariadiv vybukhovoï rehovyny (Review of mathematical models for estimating blast wave parameters of explosive charges) // Armament and Military Equipment. 2021. No. 1. P. 77–84. (in Ukrainian)
2. Solodei I. I., Zatyliuk Gh. A., Petrenko E. Yu., Shovkivska V. V. Ohliad matematychnykh modelei ta metodiv doslidzhennia poshyrennia vybukhovoykh navantazhen v sutsilnykh seredovyshchakh (Review of mathematical models and methods to research the explosive loads propagation in continuous environments) // Strength of Materials and Theory of Structures. 2025. Issue 114. P. 76–82. DOI: 10.32347/2410-2547.2025.114.76-82. (in Ukrainian)
3. Maksimyuk Yu. V., Kuzminets M. P., Martyniuk I. Yu., Maksimyuk O. V. Doslidzhennia napruzhenno-deformovanoho stanu metalevoi smuhy u protsesi protiazhky (Investigation of the stress-strain state of a metal strip in the drawing process) // Strength of Materials and Theory of Structures. 2022. Issue 109. P. 229–238. DOI: 10.32347/2410-2547.2022.109.229-238. (in Ukrainian)
4. Tkachuk M. A., Vasyliiev A. Yu., Hrabovskiy A. V. et al. Vplyv udarnoi khvyli na vtratu stiikosti bronekorpusiv lehkobronovanykh mashyn (Influence of a shock wave on the buckling of armored hulls of light armored vehicles) // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Mechanical Engineering and CAD. 2025. No. 1. P. 73–91. DOI: 10.20998/2079-0775.2025.1.08. (in Ukrainian)
5. Ratushniak H. S., Pankevych V. V. Identyfikatsiia faktoriv, yaki vyznachaiut bezpeku vikon pry dii vybukhovoï khvyli (Identification of factors determining window safety under blast wave action) // Modern Technologies, Materials and Structures in Construction. 2023. No. 2(42). P. 42–48. (in Ukrainian)
6. Orlenko M. O. Vyprobuvannia svitloprozorykh konstrukttsii na stiikist do udarnykh khvyli: analiz mizhnarodnykh standartiv ta perspektyvy yikh zastosuvannia v Ukraini (Testing translucent structures for shock wave resistance: analysis of international standards and prospects for their application in Ukraine) // Modern Problems of Architecture and Urban Planning. 2025. Issue 71. P. 658–669. DOI: 10.32347/2077-3455.2025.71.658-669. (in Ukrainian)
7. Orlenko M. O., Buravchenko V. S., Bisyk S. P. Dosvid naturnykh vyprobuvan vikonnykh blokiv riznoho konstruktyvnogo skladu na udarno-khvylovu stiikist (Experience of full-scale tests of window units of different compositions for shock-wave resistance) // Strength of Materials and Theory of Structures. 2025. Issue 115. P. 383–395. DOI: 10.32347/2410-2547.2025.115.383-395. (in Ukrainian)
8. Kinney G. F., Graham K. J. Explosive shocks in air. 2nd ed. Berlin ; New York : Springer-Verlag, 1985. 269 p. (in English)
9. Newmark N. M., Hansen R. J. Design of blast resistant structures. Shock and Vibration Handbook / eds. C. M. Harris, C. E. Crede. New York : McGraw-Hill, 1961. Vol. 3. (in English)
10. Henrych J. The dynamics of explosion and its use. Amsterdam : Elsevier, 1979. 558 p. (in English)
11. Swisdak M. M. Simplified Kingery airblast calculations. Minutes of the 26th DoD Explosives Safety Seminar. Maryland, 1994. 17 p. (in English)
12. Bisyk S. P., Chepkov I. B., Vaskivskyy M. I. et al. Methods for modelling air blast on structures in LS-DYNA. Comparison and analysis // Weapons and Military Equipment. 2019. No. 1(21). P. 22–31. DOI: 10.34169/2414-0651.2019.1(21).22-31. (in English)
13. Hallquist J. O. LS-DYNA Theory Manual. Livermore : Livermore Software Technology Corporation, 2006. 680 p. (in English)
14. DSTU EN 13124-2:2006 (EN 13124-2:2004, IDT). Vikna, dveri ta zhaliuzi. Stiikist do vybukhu. Metod vyprobuvannia. Chastyna 2: Polihonne vyprobuvannia (Windows, doors and shutters. Explosion resistance. Test method. Part 2: Range test). Kyiv : Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2008. 11 p. (in Ukrainian)